

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-310512

(43)Date of publication of application : 07.11.2000

(51)Int.Cl.

G01B 11/06
B24B 37/04
B24B 49/12
H01L 21/304
H01L 21/66

(21)Application number : 11-121251

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 28.04.1999

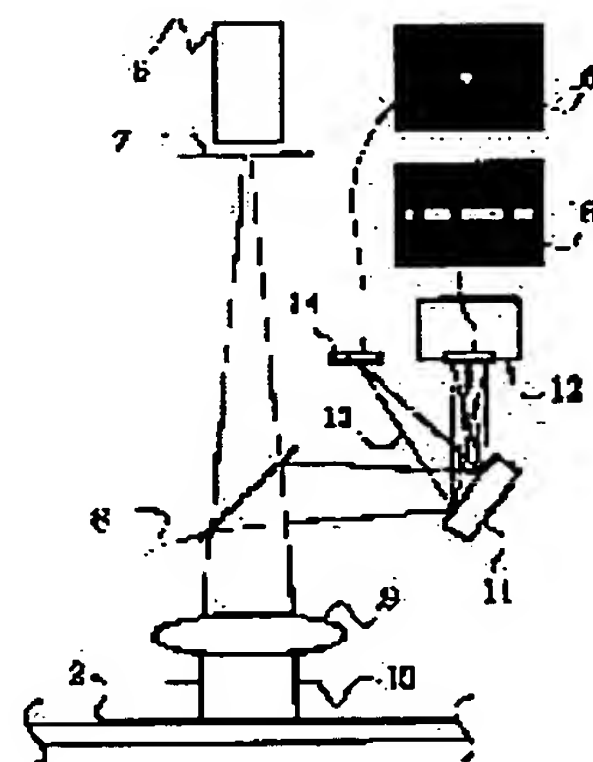
(72)Inventor : HIROSE TAKESHI
KENBO YUKIO
NINOMIYA TAKANORI
TSUCHIYAMA YOJI
NOGUCHI MINORU
KANAI FUMIYUKI
NOMOTO MINEO(54) METHOD AND DEVICE FOR MEASURING FILM THICKNESS OF THIN FILM AND
METHOD AND DEVICE FOR MANUFACTURING THIN FILM DEVICE USING THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To accurately measure the film thickness and the distribution of film thickness without influence of a base pattern by optically obtaining a film thickness of a transparent film according to the frequency and phase of spectral waveform of a detected reflection light.

SOLUTION: A light reflected on a wafer passes through an iris focus 10 and a lens 9, and its optical path is changed through a beam splitter 8 and enters a diffraction grating 11. A light splitted spectrally by the diffraction grating 11 is formed on a detector 12, and its spectral intensity distribution 15 can be obtained. The reflection light produces an interference due to a film to be measured, and it has a distribution of spectral intensity corresponding to the structure within a film.

The distribution of spectral intensity is subjected to film-thickness calculation processing such as correction and frequency analysis, etc., so as to obtain a film thickness. A light source having a wide wavelength band range such as a tungsten halogen lamp, a xenon lamp, etc., is preferably used as a white light source 6. A laser light with a plurality of different wavelengths may be also used. A CCD two-dimensional sensor or a one-dimensional line sensor may be used as a detector 12.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of

rejection]

[Kind of final disposal of application other than
the examiner's decision of rejection or
application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームト [*] (参考)
G 0 1 B 11/06		G 0 1 B 11/06	G 2 F 0 6 5
B 2 4 B 37/04		B 2 4 B 37/04	K 3 C 0 3 4
49/12		49/12	3 C 0 5 8
H 0 1 L 21/304	6 2 2	H 0 1 L 21/304	6 2 2 S 4 M 1 0 6
21/66		21/66	P
審査請求 未請求 請求項の数21 O L (全 17 頁)			

(21)出願番号	特願平11-121251	(71)出願人	000005108 株式会社日立製作所 東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地
(22)出願日	平成11年4月28日(1999.4.28)	(72)発明者	廣瀬 丈師 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式 会社日立製作所生産技術研究所内
		(72)発明者	見坊 行雄 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式 会社日立製作所生産技術研究所内
		(74)代理人	100075096 弁理士 作田 康夫
		最終頁に続く	

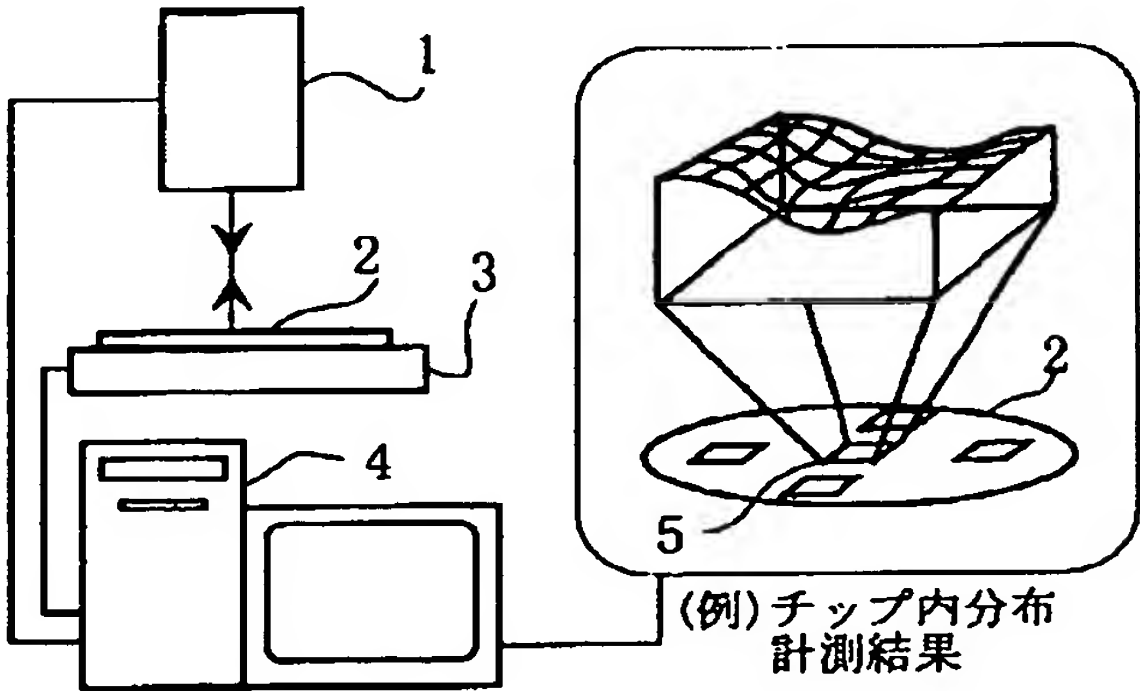
(54)【発明の名称】 薄膜の膜厚計測方法及びその装置並びにそれを用いた薄膜デバイスの製造方法及びその装置

(57)【要約】

【課題】実際の製品の最表面の透明な膜の厚さを、下地のパターンの影響を受けることなく高精度に計測して、高品質な膜厚の管理および、加工のスループットの向上を図る。

【解決手段】実際のデバイスパターンでの高精度膜厚計測が可能な膜厚計測ユニットを研磨装置に組み込むことにより、高精度の膜厚計測により高精度の膜厚管理を実現する。および、加工のスループットの向上を実現する。高精度の計測方法として白色光の膜による干渉光の分光波形に対して周波数解析し、波形の含む周波数成分の位相と膜厚の関係から膜厚の絶対値の算出を行う。

【図1】



【特許請求の範囲】

【請求項 1】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射し、該白色光の照射により前記試料から発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜の膜厚計測方法。

【請求項 2】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射し、該白色光の照射により前記試料から発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜の膜厚計測方法。

【請求項 3】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射し、該白色光の照射により前記試料から発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜の膜厚計測方法。

【請求項 4】前記光学的に透明な膜の膜厚を、 $\pm 20 \text{ nm}$ 以下の精度で求めることを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れかに記載の薄膜の膜厚計測方法。

【請求項 5】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記試料から発生する反射光を検出する検出手段と、該検出手段により検出した反射光の分光波形に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜の膜厚計測装置。

【請求項 6】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記試料から発生する反射光を検出する検出手段と、該検出手段により検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜の膜厚計測装置。

【請求項 7】表面に光学的に透明な薄膜を形成した試料に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記試料から発生する反射光を検出する検出手段と、該検出手段により検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜の膜厚計測装置。

【請求項 8】前記膜厚算出手段は、前記光学的に透明な膜の膜厚を、 $\pm 20 \text{ nm}$ 以下の精度で算出することを特徴とする請求項 5 乃至 7 の何れかに記載の薄膜の膜厚計測装置。

【請求項 9】薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する工程において、前記光学的に透明な膜に白色光を照射し、該白色光の照射により前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 10】薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する工程において、前記光学的に透明な膜に白色光を照射し、該白色光の照射により前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 11】薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する工程において、前記光学的に透明な膜に白色光を照射し、該白色光の照射により前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 12】前記白色光を照射し、前記反射光を検出することを、前記光学的に透明な膜を研磨しながら行うことを特徴とする請求項 9 乃至 11 の何れかに記載の薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 13】前記白色光を照射し、前記反射光を検出することを、前記光学的に透明な膜を研磨した後に行うことを特徴とする請求項 9 乃至 11 の何れかに記載の薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 14】薄膜デバイスの製造工程の途中において前記薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に光を照射し、該照射による前記薄膜デバイスからの反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 15】薄膜デバイスの製造工程の途中において前記薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に光を照射し、該照射による前記薄膜デバイスからの反射光を検出し、該検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 16】前記薄膜デバイスが半導体デバイスであって、前記光学的に透明な膜の膜厚を求めることを、半導体デバイスの基板ウェハ上に多数形成されたチップの内の少なくとも 1 つのチップに対して複数の個所で行い、該チップ内の膜厚の分布を求めることを特徴とする請求項 9 乃至 11 または 14 または 15 の何れかに記載の薄膜デバイスの製造方法。

【請求項 17】薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する研磨手段と、該研磨手段により研磨された前記光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出する検出手段と、検出手段により検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する膜厚算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜デバイスの製造装置。

【請求項18】 薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する研磨手段と、該研磨手段により研磨された前記光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出する検出手段と、検出手段により検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する膜厚算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜デバイスの製造装置。

【請求項19】 薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出する検出手段と、検出手段により検出した反射光の分光波形の位相に基づいて前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜デバイスの製造装置。

【請求項20】 薄膜デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、該照射手段により照射されて前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出する検出手段と、検出手段により検出した反射光の分光波形と膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とのフィッティングにより前記光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えたことを特徴とする薄膜デバイスの製造方法。

【請求項21】 前記薄膜デバイスが半導体デバイスであって、前記検出手段は、前記薄膜デバイスから発生する反射光を検出することを半導体デバイスの基板ウェハ上に多数形成されたチップの内の少なくとも1つのチップに対して複数の個所で行い、前記算出手段は、前記光学的に透明な膜の膜厚を前記検出手段で検出した前記多数形成されたチップの内の少なくとも1つのチップの複数の個所について算出して該チップ内の膜厚の分布を求めることを特徴とする請求項17乃至20の何れかに記載の薄膜デバイスの製造装置。

【発明の詳細な説明】

【発明の属する技術分野】 本発明は透明な膜の厚さおよび厚さ分布の計測および膜厚管理に関し、例えばシリコンウェハ上に半導体デバイスを製造する製造ラインで、成膜工程または成膜後表面の平坦化処理工程において、ウェハの最表面膜厚を計測する方法、および膜厚を計測することにより、成膜工程または平坦化処理工程を管理する方法に関する。透明膜の例としては、上記の他DV D、TFT、LSIレチクル等の薄膜デバイスの製造工程におけるレジスト膜や絶縁膜等も含まれる。

【従来の技術】 例えば、半導体デバイスは成膜、露光およびエッチングにより、デバイスおよび配線パターンをシリコンウェハ上に形成することにより製造される。近年、高精度化・高密度化を実現するために微細化・多層化の方向に進んでいる。このことによってウェハ表面の

凹凸が増大している。このようなウェハ上の凹凸は配線等の形成に不可欠な露光を困難とするため、ウェハ表面の平坦化が行われる。この平坦化プロセスとして、化学的および物理的作用により表面を研磨して平坦化を実現する方法（CMP：Chemical Mechanical Polishing）が用いられる。CMPは当該技術分野において既知の加工方法である。CMP加工において重要な課題として、膜厚管理が挙げられる。従来は、これを加工時間によって管理していた。一般的には、CMP加工の前後で膜厚を計測することにより求まる研磨量と実際に加工を行った研磨時間とから研磨レートを算出し、これを次の加工時間にフィードバックさせるというものである。膜厚を計測する際は、チップ周辺部等に形成された従来の膜厚計測装置で十分計測可能な大きさをもったパターン（ダミーパターン）上を計測していた。特開平6-252113号公報や特開平9-7985号公報では、実際のデバイスパターン（実際の製品の微細な回路パターン）上の膜厚の計測が可能なin-situ計測システムの開示がなされている。特開平9-109023では加工後、洗浄をせず水中に保持したままで膜厚を計測することによりスループットの向上を実現するIn-line計測システムの開示がなされている。特開平6-252113号公報では実際のデバイスパターン上の膜厚計測に白色光の膜による干渉光の分光分布を周波数解析し、分光波形の持つ周波数成分と膜厚との関係に着目し膜厚の絶対値を算出する。また特開平9-193995号公報では、分光波形の極値位置（波長）の検出等から加工の終点検出をするin-situ計測システムの開示がなされている。一方、特開平9-7985号公報ではレーザー（単波長）の膜による干渉光強度の加工時間による変化を検出し、その波形の持つ周波数成分から膜厚の算出を行うものである。

【発明が解決しようとする課題】 例えば半導体デバイスの製造工程に於ける配線工程を考えた場合、CMP加工を行っても表面が完全に平坦にはならない場合が多い。この原因は、膜下層の配線パターンの局所的な面積に占める割合（パターン面積率）が一様ではないからである。一般的に、下層のパターン面積率と加工後の膜厚との間には相関があることが知られている。加工後の膜厚のばらつきが大きい場合、その後の露光工程やエッチング工程において不良の原因となる。そこで加工後の膜厚を評価する必要がある。しかし従来の膜厚計測装置では上記のように数〜数十マイクロメートル以上の一様なパターン上の膜厚しか検出することが出来ない。そのため、計測可能な部分が限られ、正確に膜厚のばらつきを評価することが出来なかった。特開平6-252113号公報では白色光の検出波長帯域にもよるが、実際のデバイスパターン上での計測精度は±50nmであり高精度で膜厚を算出することができない。一方、一般にCMPの加工時間による膜厚管理では、単位時間あたりの研磨量（研磨レート）が変動すること等のため、精度の高

い膜厚管理が困難であった。また従来は洗浄・乾燥後に膜厚を計測していたため、スループット低下の原因となっていた。特開平9-7985号公報は膜厚の絶対値を求めることはできず、また対象が配線工程のような複雑の構造の場合は適用困難である。特開平9-109023では限られた部分の膜厚しか計測できない。また、積層されるパターン、例えば配線パターンの厚さ、パターン間容量の管理も、ダミーパターン上の膜厚管理では精度良くできなかった。また、実際のデバイスパターンの欠陥検査において膜厚方向の検査は困難だった。本発明の目的は、透明な膜の膜厚および膜厚分布を、下地パターンの影響を受けることなく高精度に計測できる方法とその装置、並びに、それを用いた薄膜デバイスの製造方法及びその装置を提供することを目的とする。また、本発明の目的は、透明な膜の膜厚および膜厚分布を例えば実際のデバイスパターン上で $\pm 10 \text{ nm}$ 以下の精度で計測できる方法及びその装置並びにそれを用いた薄膜デバイスの製造方法及びその装置を提供することを目的とする。その一例としてCMP加工について、実際のデバイスパターンとは研磨レートが異なるダミーウェハまたは製品ウェハ上に形成された従来の膜厚計測装置で計測可能な大きさを有するダミーパターン上の膜厚ではなく、実際の製品のデバイスパターン上の最表面膜厚の絶対値を高精度で計測可能な計測方法・装置を提供すること、実際のデバイスパターン上の最表面膜厚の計測を高精度に行うことにより高精度の膜厚管理を可能とする方法および装置、およびプロセスのスループットの向上を実現する方法および装置を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために本発明では、実際のデバイスパターン上の膜厚計測手法として白色光の膜による干渉光の分光波形に対して周波数・位相解析し、波形の持つ周波数及び位相成分と膜厚の関係から、または膜の構造モデルあるいはシミュレーションから導かれる波形とをフィッティングさせることにより膜厚の絶対値の算出を行う。前記、計測技術を用いて実際のデバイスパターン上の膜厚分布等を求めることにより、高精度膜厚管理及びプロセス安定化を行う。及び前記、計測技術を搭載した膜厚計測ユニットを研磨装置に組み込むことにより、スループットの向上を実現する。上記目的を達成するために、本発明では、半導体デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する工程において、光学的に透明な膜に白色光を照射し、半導体デバイスからの反射光を検出し、この検出した反射光の分光波形の周波数及び位相に基づいて、または膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とをフィッティングさせることにより光学的に透明な膜の膜厚を求めるようにした。本発明では、半導体デバイス製造工程、例えばエッチング工程等の途中において半導体デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に光を照射し、この照射による半導体デバイスからの反射

光を検出し、この検出した反射光の周波数及び位相に基づいて、または膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とをフィッティングさせることにより光学的に透明な膜の膜厚を求めるようにした。本発明では、前記膜厚計測手段によって、半導体デバイス上に形成された光学的に透明な膜の膜厚分布を、デバイスパターンによらず、例えばウェハ上の任意の位置で高精度に計測できるようにした。本発明では、前記膜厚分布計測結果に基づいて成膜やエッチング等の前後プロセスを含めたプロセスの安定化、最適化を行えるようにした。本発明では、前記膜厚計測手段によって、半導体デバイス上に形成された光学的に透明な膜の膜厚分布を高精度に計測する際に、計測視野の大きさ及び形状を任意に可変とし、計測対象及び目的に応じて、例えばチップ表面の凹凸の傾向を見たいときは視野の大きさを大きくする等の視野の大きさ及び形状の最適化を行えるようにした。本発明では、前期膜厚計測手段によって、製造の各工程で膜厚計測を行う等により多層に形成された半導体デバイスの表面の膜厚だけでなく下層の膜厚を計測できるようにし、デバイスの性能の予測及びプロセスの安定化および最適化を行えるようにした。本発明では、前記半導体デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する工程において、光学的に透明な膜に白色光を照射し、半導体デバイスからの反射光を検出し、この検出した反射光の分光波形に基づいて表面の凹凸を計測することにより、前後プロセスを含めたプロセスの安定化、最適化を行えるようにした。本発明では、半導体デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜を研磨する研磨手段と、この研磨手段により研磨された光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、この照射手段により照射されて半導体デバイスから発生する干渉光を検出する検出手段と、この検出手段により検出した干渉光の位相に基づいて、または膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とをフィッティングさせることにより光学的に透明な膜の膜厚を算出する膜厚算出手段とを備えた半導体デバイスの製造装置を構成した。また、本発明では、半導体デバイスの表面に形成した光学的に透明な膜に白色光を照射する照射手段と、この照射手段により照射されて半導体デバイスから発生する干渉光を検出する検出手段と、この検出手段で検出した干渉光の位相に基づいて、または膜の構造モデルまたはシミュレーションから導かれる波形とをフィッティングさせることにより光学的に透明な膜の膜厚を算出する算出手段とを備えた半導体デバイスの製造装置を構成した。

【発明の実施の形態】本発明の実施の形態例として、図1に、半導体デバイスの製造におけるCMP加工後または加工中のウェハを対象とし最表面膜厚の計測に適用した例を示す。1は検出光学系、2はウェハ、3はウェハ2を載せるステージ、4はパーソナルコンピュータで、検出光学系1でウェハ2を計測した結果を用いて、膜厚に

関する情報を求める。図2に、本発明を実現するための検出光学系1の例を示す。検出光学系1は、白色光源（ハロゲンランプ）6、ピンホール7、ビームスプリッター8、レンズ9、光彩しぼり10、回折格子11、検出器（CCDカメラ）12により構成する。光源6より出た白色光はピンホール7およびビームスプリッター8を通り、レンズ9によって平行光となり光彩しぼり10を通過してウェハ2の表面の被測定膜（図示せず）に入射する。ウェハ2によって反射した光は、光彩しぼり10、レンズ9を通りビームスプリッター8により光路を変更し、回折格子11に入射する。回折格子11によって分光された光は検出器12上で結像し、分光強度分布15を求めることができる。この反射光は被測定膜により干渉を生じ、膜内の構造に対応した分光強度分布を持つ。この分光強度分布に対して補正および周波数解析等の膜厚算出処理をすることにより該膜厚を算出する。白色光源6としては、ハロゲンランプの他にキセノンランプ等の広い波長帯域を持つ光源を用いても良い。また複数の異なる波長のレーザー光を用いてもよい。検出器12としては、CCD2次元センサーの他に1次元のラインセンサーを用いてもよい。2次元センサーを用いることによりラインセンサーの配列方向を回折光にあわせる調整を省くことができる。またCCD以外のセンサーを用いてもよい。上記実施例では、ウェハへの照明・反射とも平行光のため、この場合は基本的にオートフォーカスを必要としない。図3は、データの取り込みから膜厚算出までの処理の流れを示したものである。CCDカメラで取り込むことができるデータは、分光強度分布である。取り込んだ2次元画像（図137）から分光強度波形を求めるには、画像の1軸方向の各座標で最大値をとることにより求めることができる（データ入力（図3））。2次元センサーの1軸と回折光分布とが一定の角度をなす時は、その角度から計算により角度によるずれを補正する。要は2次元の分光分布画像を1次元の分光波形に変換できればよい。また2次元センサの分光分布方向に数ラインずつを処理し、画面内の場所による差を軽減する方法もある。これにより、各種補正を2次元画像で実施できる。さらには後述するように光学系の補正を加えてさらに高精度化する方法もある。得られた分光強度波形は光源の持つ分光強度特性および光学系の影響を受ける。予め光源の分光強度分布データ、あるいは反射率特性のわかっている材料で補正データを計測しておき、このデータで計測データを除する等の補正をすることにより分光反射率波形を求める（反射率補正（図3））。これにより、光源の分光分布および光学系の影響を十分小さくすることができる。周波数解析を行うには横軸を波長（ λ ）から波長の逆数（ $1/\lambda$ ）に変換する（軸変換（図3））。変換に際して検出器上の各点に結像する光の波長を知る必要がある。これは検出器と回折格子との位置関係を求めることにより、計算によって求めることができる。また

光源に白色光の代わりにレーザー光（単色光）を用い、検出器上の結像位置と回折格子と検出器の位置関係からより高精度に求めることもできる。レーザー光として複数の波長を用いることにより補正精度は向上する。単色光源を得る手段として、光源としてレーザーを用いる代わりに、白色光源と特定の波長帯域のみを通す光学フィルターとを組み合わせてもよい。測定対象が光軸に対して垂直でない場合、検出器で検出できる波長帯域に誤差を生じる。そこで、測定対象の傾きを検出することによりセンサの検出波長帯域を正確に決定することが出来る。計測対象の傾きを検出するには、正反射光（0次光）を利用する方法が考えられる。0次光13の位置を検出する絶対位置センサ14を設け、0次光画像から0次光（ピンホール7の像）の位置を重心計算等で求める。この位置から計測対象の傾きを検出することができる。0次光の検出には検出器12を必要な時に既測定値に移動（ステージ図示せず）しても可能である。当然、検出器12に必要なに応じてミラー等を用いて同時に検出する方法もある。回折光の0次光（図2の13）位置計測データによりステージ傾斜にフィードバックをかけ膜厚検出領域面が光軸に対して垂直に保つようにする方法も考えられる。白色光を計測対象に照射し、その反射光の分光分布を周波数解析することにより膜厚を求める手法の原理を周波数に着目した場合と位相に着目した場合とでその算出原理を説明する。図4に示す、膜24内にパターン22が存在する場合の単純なモデルを考える。ここで最表面膜厚とは d_1 をさす。この膜に白色光を垂直に照射させた場合、膜24表面、パターン22上面および膜下地23で反射がおこるためこれらの反射光が複雑に干渉したものとなる。図4でパターンの存在する部分Aとそうでない部分Bとに分けて考えると、それぞれの部分では単純な単層の膜と同様の構造となる。膜24表面、パターン22上面および膜下地23のそれぞれの反射率を r_3 、 r_2 及び r_1 、パターンの存在する部分の表面に占める割合を α とすると、フレネルの式より膜全体での強度反射率 R は数1で表される。 n は膜23材質の屈折率を、 λ は光の波長を表す。数1を変形して、高次の項を無視する等の近似を行うと、強度反射率 R は数2で表させる。ここで r_3 、 r_2 及び r_1 を波長によらず一定とし、 $1/\lambda$ [$1/\mu\text{m}$] を横軸に考えた場合、この膜によって生じる干渉光の分光反射率分布は、膜厚 d_1 、 d_2 および d_3 に対応する周波数をもつ三つの正弦波と定数の和で表される。ここでそれぞれの正弦波の角周波数を ω_i ($i=1, 2, 3$) とすれば数2は数3となる。よってそれぞれの角周波数 ω_i ($i=1, 2$ および 3)と膜厚 d_i との関係は数4で表される。このように、分光反射率分布波形に対して周波数解析を行い波形の持つ周波数成分を求めることにより各部の膜厚を算出することができる（数5）。

【数1】

$$|R|^2 = |\alpha R_A + (1-\alpha)R_B|^2$$

$$= \left| \alpha \frac{r_3 + r_1 e^{-2\pi 2d_3 \frac{n}{\lambda}}}{1 + r_1 r_3 e^{-2\pi 2d_3 \frac{n}{\lambda}}} + (1-\alpha) \frac{r_3 + r_2 e^{-2\pi 2d_1 \frac{n}{\lambda}}}{1 + r_2 r_3 e^{-2\pi 2d_1 \frac{n}{\lambda}}} \right|^2 \quad \dots \dots \dots \text{(数1)}$$

n : 膜材質の屈折率
 λ : 波長[nm]

【数2】

$$|R|^2 = A + B \cos\left(2\pi \cdot 2d_1 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) + C \cos\left(2\pi \cdot 2d_2 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) + D \cos\left(2\pi \cdot 2d_3 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) \quad \dots \text{(数2)}$$

A, B, C 及び D は r_3 , r_2 及び r_1 で表される値

【数3】

$$|R|^2 = A + B \cos\left(\omega_1 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) + C \cos\left(\omega_2 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) + D \cos\left(\omega_3 \cdot \frac{n}{\lambda}\right) \quad \dots \text{(数3)}$$

【数4】

$$\omega_i = 2\pi \cdot 2d_i \cdot n \quad \dots \dots \dots \text{(数4)}$$

【数5】

$$d_i = \frac{\omega_i}{4\pi \cdot n} \quad \dots \dots \dots \text{(数5)}$$

次に周波数と位相から膜厚を算出する方法について説明する。図5(a)は図4に示す膜構造で $d_1=400$, $d_2=180$ 0及び $d_3=2200$ とおいたときの干渉光の理論分光反射率分布25を横軸に波長の逆数をとって示したものである。実

際に検出器によって検出できる波長の帯域は限られるため、求めることができる分光反射率分布 R は数6で表される(図5(b)参照)。ここで λ_0 は検出可能な波長帯域の最大値を表す。周波数による算出の時と同様に、それぞれの正弦波の位相を ϕ_i とすれば数6は数7となる。数8は位相 ϕ_i と膜厚 d_i との関係を示したものである。膜厚に比例して位相が変化する。このように、周波数解析を行って位相を求めることによって膜厚を算出することができる(数9)。

【数6】

$$|R|^2 = A + B \cos\left\{2\pi \cdot 2d_1 \cdot n \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)\right\} + C \cos\left\{2\pi \cdot 2d_2 \cdot n \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)\right\} \quad \dots \text{(数6)}$$

$$+ D \cos\left\{2\pi \cdot 2d_3 \cdot n \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)\right\}$$

【数7】

$$|R|^2 = A + B \cos\left(\omega_1 \cdot \frac{1}{\lambda} - \phi_1\right) + C \cos\left(\omega_2 \cdot \frac{1}{\lambda} - \phi_2\right) + D \cos\left(\omega_3 \cdot \frac{1}{\lambda} - \phi_3\right) \quad \dots \text{(数7)}$$

【数8】

$$\phi_i = 2\pi \cdot 2d_i \cdot n \cdot \frac{1}{\lambda_0} \quad \dots \dots \dots \text{(数8)}$$

【数9】

$$d_i = \frac{\phi_i \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n} \quad \dots \dots \dots \text{(数9)}$$

周波数解析にFFTを用いた場合、解析によって求めら

れる位相 τ_i は、 $-\pi$ から π の間の値として求まる。そのため数9は数10のように書ける。この位相 τ_i は全体の位相の変化量 ϕ_i から $2m\pi$ だけ引いた部分となる。例えば波長帯域400~800nmを考えた場合、膜厚に対する周波数及び位相の変化量を比較すると位相の変化量のほうが大きいことがわかる。よって周波数による算出よりも高い精度が得られる。

【数10】

$$d_i = \frac{(\tau_i + 2m\pi) \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n} \quad \dots \dots \dots \text{(数10)}$$

ただし $m = 1, 2, 3, \dots$

【数11】

$$\tau_i = \frac{4\pi \cdot n d_i}{\lambda_0} - 2m\pi$$

図3の軸変換までの補正を行ったデータに対して周波数解析を行い、分光反射率分布波形の含む周波数とその位相とを求める。このとき周波数解析手法としてはFFTやMEMまたはその他の周波数解析手法を用いてもよい。最表面の膜厚による成分を識別するには、例えば予め指定したある範囲内で最も強度の大きい周波数成分を抽出する方法がある。また、図4を例にした場合加工の前後で d_2 は変化しない。加工の前後でスペクトル位置が変化するものの中で最も角周波数が小さいものが最表面膜厚を示す。よって計測対象膜が複数層のパターンが存在する場合でも、計測を複数回行うことによりスペクトル位置の変化のあるものの中で最も角周波数の小さいものを最表面膜厚を示すと判断することができる。本実施例では周波数解析にFFTとMEMとを用いた場合を示す(図3)。角周波数を用いて膜厚を算出する場合は、FFTによる角周波数スペクトル強度分布またはM

・・・ (数11)

EMによる角周波数スペクトルの強度分布17の極大値を示す角周波数をもとめ、数3にその角周波数を代入することにより求める(図3(a))。図3(b)を用いて周波数解析にFFTを用いた場合の位相を用いた膜厚算出の一例を説明する。数10を数12に書き換える。図6中の51は角周波数分布を、19は位相分布を表す。位相による算出の場合は、数13において m を決める必要がある。 m を決定する方法としては、まず周波数の場合と同様に角周波数スペクトル強度の極大値を示す角周波数20をもとめる。同時にこの角周波数の位相21を求める。求めた角周波数より一旦数2により膜厚を算出する。数3によって求めた膜厚が数13を満たすように整数 m を決定する。この m より数12から d_{fi} を、極大値を示す角周波数の位相から $d_{\tau i}$ を求める。 d_{fi} と $d_{\tau i}$ の和をとることにより膜厚 d_i を求めることができる。

【数12】

$$d_i = \frac{(\tau_i + 2m\pi) \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n} = \frac{\tau_i \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n} + \frac{m\lambda_0}{2n} = d_{\tau i} + d_{fi} \quad \dots \dots \dots \text{(数12)}$$

ただし $d_{\tau i} = \frac{\tau_i \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot n}, d_{fi} = \frac{m\lambda_0}{2n}$

【数13】

$$\frac{(m-1/2) \cdot \lambda_0}{2n} < d_{fi} < \frac{(m+1/2) \cdot \lambda_0}{2n} \quad \dots \dots \dots \text{(数13)}$$

位相を用いて膜厚を算出する際も周波数解析手法としてFFT以外の周波数解析手法を用いてもよい。周波数解析にFFTを用いる場合、解析結果の周波数分解能は解析データの長さによって決まる。周波数と膜厚とは比例関係にあるため、必要な算出結果の分解能を得るには周波数分解能を高くする必要がある。このために算出した横軸が波長の逆数の分光反射率分布のデータに対し、解析結果の分解能が必要な分解能を得るに必要なデータ数となるように0値のデータを付け加えた後に周波数解析を行う。こうすることにより任意の周波数分解能が得られる。または周波数解析結果に対してスプライン等の補完手法を適用しても良い。周波数解析にFFTを用いた場合、解析結果の角周波数スペクトルは周波数解析時の窓関数によって決まる特有の分布を持つ。このため2つのスペクトルの位置が近い場合、スペクトルの分布が重なるためそのピークは真のピーク位置よりずれる。そこで得られる角周波数スペクトルに対しSimplex法等の波形分離処理を用いてスペクトル位置を求めることにより正確な極大値を求めることができる。周波数解析にMEM(Maximum Entropy Method: 最大エントロピー法)等の、スペクトル位置が近い場合にもそのスペクトルの重なるの小さいまたは無い周波数解析手法を用いてもよ

い。MEMは解析時に設定する解析モデル次数によって結果が異なるという特徴を持つため最適化が必要である。対象波形の解析範囲を最適化することにより解析モデル次数によるばらつきがなく誤差の小さい解析を行うことができる。解析範囲を変えて複数の次数により解析を行い、目的のスペクトル位置が解析次数によらない一定となる様に解析範囲を選ぶことで最適化ができる。計測対象の屈折率や吸収係数の検出波長帯域内での変化がある場合、検出できる分光波形はその変化に起因する変形した波形となり算出値に誤差を生じる。周波数解析の前に波形全体のトレンド除去や、影響を打ち消す係数分布を分光分布に加えるまたは乗ずる等の処理を行うことにより、補正することができる。上記位相を利用した実施例により得られる膜厚計測精度は $\pm 20 \text{ nm}$ 以下(パターン面積率: 20%程度, 配線幅: $0.35 \mu\text{m}$)となり、周波数のみからによる方法(計測精度: $\pm 50 \text{ nm}$)と比較して高い計測精度が得られる。従来の光学式の計測手法では、計測対象に例えば $1 \mu\text{m}$ 以上の大きさの計測視野内で一様の構造であることが必要であった。本実施によれば、計測視野内にデバイスパターン等の段差が存在する場合そのパターン上の膜厚を計測することができる。このとき計測精度は対象とするパター

ンよりも下層からの反射光の影響を受けるため計測視野におけるパターンの占める割合（パターン面積率）及びパターンの形状に依存する。例えば、計測対象がサブミクロンピッチのラインアンドスペース状のパターン上の膜厚である場合、光はパターンにより回折を起こすため、下層からの反射光は同じ面積率の単体のパターンの場合よりも相対的に強度が小さくなる。このため、計測には微細なパターンの方が都合が良い。図6は図4と同様の構造をもつサンプルに対して最表面の膜厚（d1）を周波数と位相とにより求めた結果を示す。図6より位相で算出するほうが周波数で算出するより高い精度で計測できることが解る。実際のデータから膜厚を算出する際にはノイズ等が含まれるため周波数による算出では周波数解析の際の誤差が大きい。位相による算出では周波数によるより分解能が高い、すなわち膜厚の変化量に対して変化量が大きいために相対的に誤差の小さい高精度の算出が可能となる。上述は図4に示す比較的単純な構造の場合について説明したが、パターンが複数層の場合でも同様の手法で最表面の膜厚の計測が可能である。この場合、複数層とは配線自体が多層に配置されている場合と、その配線間の絶縁膜自体が多層構造の場合の2つをさす。膜が複数層の場合で個々の材質の特性が近い場合や、検出できる波長帯域に対して膜が非常に薄い場合、上記周波数解析を用いた手法では実際の膜厚と算出値とが線形一次の関係にならない場合がある。この場合算出誤差を小さくするために、実際の膜厚と算出値との関係に適切な曲線を仮定し、算出値を補正すればよい。この補正のための曲線を創出する方法としては、構造及び材質が既知であれば分光波形を算出でき、この波形から本手法で膜厚を算出することによって得ることができる。また、他の信頼できる膜厚計測装置を用いて実際の試料を計測し、その計測結果と本手法での計測結果とを比較することによっても得られる（図7参照）。白色光を計測対象に照射し、その反射光の分光分布と理論分光分布とをフィッティングさせることにより膜厚を求める手法の原理を示す。前述のように、計測対象の膜構造とそれぞれの層の材質が既知であれば、その構造の膜に白色光を照射したときの分光反射率波形を算出することができる。この理論分光反射率波形を、膜厚等をパラメータとして実際に計測した分光反射率分布と比較し、両者の誤差が最も小さくなるようなパラメータを選定（フィッティング）することにより膜厚を算出することができる（図8参照）。この手法も従来は、計測視野内で計測対象の構造が一様であるものに対して適用されていた。しかし、例えば図4のような計測視野内で構造が一様でない場合でも、その構造と構造に起因する回折の影響を理論計算に取り入れれば、構造が一様な場合と同様にフィッティングにより膜厚を算出することができる。計測対象構造は設計情報から得ることができる。上記フィッティング手法を用いれば、計測精度±5nm程度が得ら

れる。計測対象とする構造が複雑な場合は、分光反射率分布波形（横軸が波長の逆数）に対して、移動平均処理等の適当なフィルタ処理により特定の周波数の波形を抽出あるいは減衰させてからフィッティングを行っても良い。次に上記の膜厚検出系のCMP加工装置又はラインへの適用方法の実施例を示す。適用方法に関する第一の実施例を図8（a）に示す。第一の実施例は従来のStand-aloneタイプの膜厚計測装置の代わりに本発明の膜厚計測技術を搭載した膜厚計測装置を用いるものである。Stand-aloneタイプであるため1枚のウェハまたは1チップについて、例えばチップ内を数十～数百点計測する等の詳細な検討が可能である。適用方法に関する第二の実施例を図8（b）に示す。第二の実施例は研磨加工終了後にウェハを一時保管するストッカー（保管庫）内またはストッカーに搬送されるまでのウェハ経路30の途中に計測ステージを設け、計測を行う。適用方法に関する第二の実施例により、in-lineの計測が可能となる。適用方法に関する第二の実施例により、計測した膜厚情報の利用方法を示す。計測した膜厚から、研磨レートを算出しこれを次に加工するウェハの研磨時間にフィードバックする。適用方法に関する第二の実施例によって膜厚を計測した場合、膜厚を既製の膜厚計で測定する際の洗浄・乾燥に要する時間を短縮できスループットの向上がはかれる。得られた膜厚情報からそれが所望の膜厚に達しているか、または予め設定した膜厚の範囲に入っているかを判断し、膜厚が予め設定された厚さ又は範囲に達していない場合そのウェハの再加工等を判断することもできる。適用方法に関する第三の実施例を図8（c）に示す。検出光学系1を研磨盤29に設置し、研磨盤29表面に計測窓を設け、その窓から膜厚の計測を行う。適用方法に関する第三の実施例により、加工を中断することなくin-situで計測が可能となる。適用方法に関する第三の実施例により、計測した膜厚情報の利用方法を説明する。計測した膜厚から、研磨レートを算出しこれを次に加工するウェハの研磨時間にフィードバックする。適用方法に関する第三の実施例によって膜厚を計測した場合、膜厚を既製の膜厚計で測定する際のウェハのロード、アンロードおよび洗浄・乾燥に要する時間を短縮できスループットの向上がはかれる。計測はin-situで行われるため、得られた膜厚情報から研磨レートを算出し現在研磨を行っているウェハの研磨時間にフィードバックすることもできる。また得られた膜厚情報からそれが所望の膜厚に達しているか、または予め設定した膜厚の範囲に入っているかを判断し加工の終了を判定することもできる。適用方法に関する第四の実施例を図8（d）に示す。第四の実施例はCMP加工を一時中断し、ウェハ支持具28を研磨盤29から離し研磨盤29とウェハ支持具28との間に検出光学系1を挿入、またはウェハ支持具28を研磨盤29上よりずらして研磨盤付近に設置した検出光学系上に移動して膜厚の計測を行う。適用方法に関する

第四の実施例により、加工を一時中断することによりin-lineで計測が可能となる。適用方法に関する第四の実施例により、計測した膜厚情報の利用方法を説明する。計測した膜厚から、研磨レートを算出しこれを次に加工するウェハの研磨時間にフィードバックする。適用方法に関する第二の実施例によって膜厚を計測した場合、膜厚を既製の膜厚計で測定する際のウェハのロード、アンロードおよび洗浄・乾燥に要する時間を短縮できスループットの向上がはかれる。計測は加工を中断して行われるため、得られた膜厚情報から研磨レートを算出し現在研磨を行っているウェハの研磨時間にフィードバックすることもできる。また得られた膜厚情報からそれが所望の膜厚に達しているか、または予め設定した膜厚の範囲に入っているかを判断し加工の終了を判定することもできる。次に上記それぞれの適用方法における実施例の詳細を示す。図9は適用方法に関する第一の実施例のための装置システムの一例の詳細を示したものである。分光波形を検出する検出光学系1、ステージ3、ステージ制御部31、膜厚算出及び計測点選定を行う信号処理部32、計測設定及び結果等を表示するためのインターフェース33を備える。信号処理部、ステージ制御部及びインターフェースとして一台又は複数台のパーソナルコンピュータを用いても良い(図1参照)。図10に検出光学系の一例の詳細を示す。白色光源34から出た光はビームスプリッタ35で方向を変え、レンズ(1)36により試料(ウェハ2)上に照射される。試料からの反射光はレンズ(2)37を介して視野絞りの役割をはたすピンホール38設置面上に結像する。ピンホールとレンズとのフーリエ変換面には空間フィルタ39が設置され試料による散乱光や回折光を削減することができる。ピンホール38を通った光は分光器40に導入され、分光波形を得ることができる。また計測位置観察及び計測点周辺の画像を取り込むためのCCDカメラ41を設置している。検出光学系には前述した図2に示す光学系を用いても良い。分光光学系は顕微鏡に分光器を取り付けることによっても実現できる。検出光学系に顕微鏡を利用するような結像系の場合、対物レンズのNAを考慮する必要がある。前述したフィッティング法を用いる場合、理論波形の算出に対物レンズNAの影響を考慮しなければならない。あるいは、上記のように空間フィルタによって0次光のみを検出し、NAの影響を削減または減少させる方法もある。周波数解析を利用する場合は空間フィルタを用いる方法のほか、前述の計測値の補正をすれば実用上問題はなくなる。信号処理部は検出した分光波形からの膜厚の算出及び計測点の分光波形やデバイス設計情報等から計測点の選定を行う。表示装置は計測対象の構造や材質等の計測に必要な情報の入力や設定に用いるほかに結果の表示を行う。検出光学系はウェハに対して位置合わせされる。計測対象によっては、計測視野サイズ、パターンの配置や形状等により計測可能な点が限られるため、計測

可能な点への位置決めが必要である。このため必要に応じてアライメント等が実施される。例えば計測視野の大きさが $\phi 10 \mu\text{m}$ 程度の場合、 $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度の位置決め精度が必要となる場合が考えられる。位置決め方法としては、オペレータの操作や、ウェハまたはチップ上の座標を指定する方法がある。位置決め方法として、チップ毎または計測対象パターン毎にアライメントまたはティーチングをすることにより正確に位置決めすることができる(図11)。パターン配置や面積率等のデバイスの設計情報から計測可能な点を決定することができる。指定した座標近傍で計測可能な点を探索し計測する方法もある。探索方法としては例えば指定座標近傍で分光波形を検出し後述する計測可否判定によって計測点を自動で選択する方法がある。計測点周辺の画像からパターンの面積率を算出し、計測可能な点を自動で選定する方法も考えられる。計測点周辺の画像は必要に応じて保存しておくことができる。実際の計測点周辺の画像と設計情報との比較により選定する方法もある(図12)。本計測技術は従来技術の様に計測視野内で一様な構造である必要がなく、適当なパターン面積率と形状であれば、チップ内で任意の位置で計測が可能である。これは例えばチップ内の膜厚を任意の間隔の格子の格子点を計測することができ(図13)、回路によらない一律すなわち標準的な膜厚管理の実現にもなる。また上記分布計測点の間隔は、パターン面積率から膜厚分布のうねりの細かさを予測することができ、この予測した大きさからサンプリング定理によって自動で決定することもできる。また位置決め方法として、上記の複数の方法を組み合わせることも考えられる。位置決め精度またはその他の原因により、所望の計測点へ位置決めされない場合が考えられる。また予め所望した計測点に位置決めされた場合でも、例えば計測点の計測視野内のパターン面積率が必要以下である場合等の実際には膜厚の計測が困難である場合が考えられる(図14参照)。この場合、位置決めされた点が所望の計測点であるかを判定(計測可否判定)する必要がある。この判定方法として計測点周辺の画像情報から得られるパターン形状や面積率、デバイスの設計情報から得られるパターン形状や面積率等を利用する。例えば、画像から計測視野内のパターン面積率を算出し、この値と予め設定したしきい値とを比較することにより判定する方法がある。位置決めされた点で分光波形を計測し、分光波形の特徴から計測可否判定をする方法がある。波形の特徴からの計測可否判定方法としては、波形の特定のピークの位置の検出による方法やFFT等の周波数解析をし特定の範囲にある周波数成分の位置や大きさから判断することも考えられる。例えば、FFT解析後ある2つの特定周波数帯域内のピークスペクトルピークに着目し、両者の大きさを比較することにより判定する方法がある。また上記処理を自動で行うことも考えられる。計測可能判定は、計測点毎に行ってもよいし、一

連の複数の計測が終了してから行っても良い。後者の場合、上記判定方法の他に判定対象点以外の点の計測結果を利用でき、より信頼性の高い判定が可能となる。計測可否判定を全点の分光検出の終了後に行う場合、計測不可の判定となった点は膜厚の算出ができず計測エラーとなる。この場合例えば、隣接する計測点の値から計測エラー点の値を補間する方法がある。このとき補間方法としては、周囲の点の平均値とする方法や線形補間やスプライン等で算出する方法がある。計測視野の大きさは検出できる光量によって制限される。必要な光量が確保できれば、任意の大きさ及び形状の計測視野で計測が可能である。膜厚を計測する際の計測視野は、その大きさ及び形状を変えることができる。切り替える方法としては、例えば対物レンズの切り替えによって視野の大きさを変化させる方法がある(図15)。ピンホールの大きさや形状を切り替えることによって変化させる方法がある。また両者の組み合わせによる方法もある。計測する際の視野の大きさによって膜厚分布計測結果は異なってくる。計測視野を小さくすればより小さい間隔で膜厚分布を求めることができる。しかし図16(b)に示すように計測視野の大きさがパターンの間隔に近い場合、パターン上の膜厚のみを評価できなくなる。そこで、計測の目的や計測対象によって計測視野の最適化を行なう。この最適化を、計測結果や予め取り込んでおいたデバイスの設計情報から自動で行うことが考えられる。視野の小さな場合は高分解能測定が可能となるが、最表面にパターンの存在しない領域では最表面パターン上の膜厚は計測できず、下層のパターンから表面の膜厚が算出されるため算出値が大きくなる。最表面パターン上(または所望)の膜厚を抽出する操作、例えば既知の膜厚値に近い値のみ抽出する、または最頻度の膜厚値を抽出する等の操作をすれば、より使いやすい情報となる、視野が大きい、例えばチップあるいはウェハの大きさ場合、その平均的な膜厚を抽出することが可能となる。チップ位置情報等にとらわれないウェハ上膜厚管理が可能となる。無論上記の中間の視野や組み合わせも可能である。本実施例による膜厚計測の結果として、チップ、ウェハ面内での膜厚分布を求めることができる。例えば、チップまたはウェハ面内での膜厚の最大値、最小値及びそれらの位置を求めることができる。膜厚の最大値、最小値及びそれらの位置を求める方法として、例えば最初は大きな間隔の格子の格子点で膜厚の分布を求めておき次にその最大値と最小値付近を小さな間隔の格子の格子点で計測を行うことにより、あるいは分布の傾斜、更にはパターン情報他のウェハの膜厚情報を利用して、計測範囲、位置を決め計測することにより、正確に求めることができる。また上記操作を自動で行うことができる。また非常に小さな間隔の格子を設定することによっても実現できる。例えば10×10mmサイズのチップ内では数百点程度の計測をすれば膜厚の最大値、最小値及びそれらの位置を

求めることができる。インターフェース(パーソナルコンピュータ)を通して計測に必要な情報の入力や設定をするほか、計測中あるいは計測終了後に計測点座標、計測点画像、計測結果、膜厚分布及び加工条件等を同時にまたは切替で表示でき、装置オペレーターが常に監視できる。膜厚を計測するためには、それに必要な情報を予め入力しておく必要がある。膜厚算出に必要な情報としては、膜の構造(縦構造、平面構造)、膜材質(屈折率、吸収係数)、膜厚の概値、算出対象膜の指定及び検出波形の補正条件(移動平均処理、トレンド除去等)等がある。また計測に必要な情報として、ウェハサイズ、チップマトリクス、計測チップの指定、計測点座標(位置、格子点の場合の格子の間隔や基準点)、計測点数、計測点位置決め操作(自動、マニュアル)、計測点位置決め方法(前述の画像処理のよる方法等)等がある。これらの入力は、数値で指定する方法のほかに例えばウィンドウズのようなGUIによって行う方法もある。膜構造の設定で膜の平面構造の設定をする場合の一例示す(図17)。例えばSTIのような構造を設定する場合、まずパターンの平面形状を設定(図17 51)する。次に設定したパターンの配置を設定する(図17 52)。これで計測視野でのパターンの形状が指定でき、パターン密度やパターンによる回折の影響を算出することができる。最後に平面状での各領域の縦構造を設定すれば膜の構造を指定することができる。例えば一チップの計測において、設定した格子の格子点上を計測する方法の一例を示す(図18)。このときチップサイズ及びチップマトリクスは予め設定されているとする。まず格子全体の大きさ及び格子の基準位置を指定する(図18の53)。次に縦横の格子の数または格子の間隔を指定する(図18の53)。最後に格子点での位置決め方法を指定する。格子は複数設定することもできる。また一度大きい間隔の格子点を計測した後、その計測結果の最大値と最小値付近を小さい格子で計測するという計測を自動で設定も可能である。ステージ上にロードされたウェハはアライメントされる。次に検出光学系は前述の方法で計測点に位置決めされる。このとき必要に応じて各チップ毎にアライメントすることもできる。位置決めされた後、オートフォーカスされ、分光波形を検出する。このとき必要に応じて前述の計測可否判定をする。検出した分光波形から同じく前述の膜厚算出アルゴリズムにより膜厚を算出する。全点計測後、計測結果を必要に応じて表示する。(図19)表示装置(パーソナルコンピュータ)は、計測結果として膜厚値、膜厚分布グラフ、膜厚の最大値、最小値及びその位置等を表示することができる。計測した膜厚分布55と別途計測した凹凸分布56と、予め取り込んでおいたデバイスパターン情報54とを同時に並べてまたは同時に重ねてまたは切り替えて表示することができる(図20)。上記を同時に表示する方法として上層から3次元的またはある切断面として表示等の

方法がある。デバイスパターン情報とは、パターンの形状や局所的なパターン面積率等をさす。膜厚分布と別途計測した凹凸分布との差をとることにより下層膜の凹凸を算出することができる。この際必要に応じて両者の値を補正する。表示手段はまた、計測データより算出された横軸が波長の逆数の分光反射率分布や計測膜厚から逆に算出した理論分光反射率分布を表示することもできる。両者を同時に表示することもでき、両者を最少二乗法等の手段を用いて比較することにより両者の相関をみることができる。またオペレーターが任意に設定した膜厚の理論分光分布と計測データより算出された分光分布とを同時に表示し比較することもできる。計測結果（膜厚値、膜厚分布、膜厚の最大値、最小値及びその位置）は必要に応じて、外部に出力できる。例えばExcel形式等で出力すれば後に利用しやすい。計測結果（膜厚分布、凹凸分布、パターン面積率分布等）の値を必要に応じて演算することにより、相関を見ることができる。これに基づきCMPの加工条件（パッド材質及び表面形状、スラリー濃度、材質及び供給量、チャック圧力、研磨盤回転数等）を変更し、ディッシング等の不良の低減や膜厚むらの低減等のCMPプロセスを最適化するための設定条件を求めることが自動でできる。例えば膜厚分布とパターン面積率との相関が小さく、かつ膜厚分布と凹凸分布との相関が大きいとき、パッドを硬質のものに変える等の最適化のための設定条件を自動で求めることができる。このようにして求めた最適化のための条件に設定した状態でCMPプロセスを行うと、下地のパターンによらず膜厚分布や凹凸分布が所定値以下の高品質な加工を実現できる。また、計測した膜厚情報に基づいて前あるいは後の工程のプロセスの最適化が自動でできる。例えば前の工程である成膜工程において、CMP加工前に膜厚を計測することにより成膜厚さがわかり、成膜仕様と比較して成膜時間等の成膜条件の最適化及び安定化のための設定条件を求めることが自動で行える。後工程においても例えばエッチ条件を実際のデバイスパターン上膜厚からより高い精度で自動で決定し、加工することができる（図21）。ウェハ支持具が加工中のウェハに対して任意の圧力分布を生じさせて加圧できる場合、上記の膜厚分布から自動で最適な加圧分布を設定し面内で膜厚が均一な加工面を得ることができる。本手法は、膜厚を計測するために分光波形を計測する必要があるが、これを既存の膜厚計測装置等で計測しても良く、その計測したデータに対して信号処理をしても膜厚算出が可能である。要は分光波形が求められればよい。例えば既存の膜厚計測装置等と膜厚算出信号処理コンピューターとをLAN等の通信手段で接続し既存装置で計測した分光分布データを自動で上記コンピューターに取り込み膜厚を算出する方法が考えられる。図は適用方法に関する第二の実施例のための装置システムの一例の詳細を示したものである。水中で膜厚を計測する方法として、水中に

表面が上向きに保持されたウェハ2に対して、検出光学系1を水中に挿入して計測を行うことによって実現できる（図22（a））。また、水中に表面が下向きに保持されたウェハ2に対して、検出光学系1を光学窓30を介して計測を行うことによって実現できる（図22

（b））。水中である以外は、基本的に前述の適用方法に関する第一の実施例のための装置システムの一例と同様である。水と大気とでは、光学的な特性が異なる。そのためウェハ（試料）が水中にある場合、検出できる分光波形63は大気中での検出62と異なる。例えば、SiO₂膜の膜厚を計測する場合、水中では検出できる波形のコントラスト（凹凸）が小さくなる。このような場合、膜下地の材質の光学的特性の影響が相対的に大きく現れる。例えば下地がTiNの場合波形全体が歪んだ形状となる。このとき、前述した周波数解析を用いた膜厚算出方法では誤差が生じる原因となる。そこで、膜下地の光学特性の影響を除去又は減少させる必要がある。これを実現する方法として、例えば前述したトレンド63を除去する方法がある。例えば上記のTiN上のSiO₂膜の場合予めTiNの光学的特性を評価しておき、評価した屈折率特性を波形に現れているトレンドとしてトレンド除去をする方法がある（図23）。第三の実施例（In-situ計測）のための装置システムの一例の詳細を示す。研磨盤に設けられた検出窓からウェハ（試料）の膜厚を計測する。スラリーが介在しているため、得られる分光波形は水中でのものと同様となる。研磨盤に設ける検出窓の大きさ及び形状は研磨に影響が出ない限り任意に決定することができる。例えば、ウェハに対してその直径の半分程度の長さでその長さの10分の1程度の幅の窓にすれば、ウェハチャックに揺動運動がある場合でも確実に1回転毎に膜厚の計測が可能となる。上記の様に大きな視野で計測する場合、計測される膜厚は計測視野内での膜厚の平均値となる。そのため検出窓を大きくすることにより、一回毎に計測位置がずれたとしても位置の違いによる膜厚ばらつきの影響を行けず、常にウェハ面内の膜厚の平均値を評価することができる。検出光学系は必要に応じてウェハにアライメントされるが、上記のように計測視野が大きい場合はアライメントが必要ないという利点がある。加工中の計測のタイミングは、例えばウェハからの反射光の強度の変化から決定する方法がある。ウェハが検出光学系上にある場合とそうでない場合とでは検出する光量が異なる。光量の変化を検出しその変化がある設定した条件を満たした場合に検出をする方法がある。検出した波形から前述したアルゴリズムにより膜厚の絶対値を算出し加工の終点検出をする。または波形の特徴の変化、例えばあるピークの位置変化から終点検出する方法も考えられる。上記計測手法をメタルのCMPに適用したとき、ウェハからの反射光の分光波形の形状変化から加工の終点検出が可能となる。適用方法に関する第三から四の実施例においてもそれぞれ検出器とウェハとの

相対位置を変化させることによってウェハ面内で複数点計測することにより膜厚の分布を得ることができる。例えば適用方法に関する第一の実施例では研磨盤とウェハ支持具との相対位置を調整する事によっても実現できる。適用方法に関する第二の実施例の場合は挿入する検出光学系とウェハ支持具との間の相対位置を任意に可変できるように検出光学系またはウェハ支持具を移動させる事によっても実現できる。膜厚分布を求める方法として、例えば直線上の複数の点の分光波形を2次元のセンサを用いて同時に検出することによっても実現できる。また、検出器とウェハの相対位置を変化させることによって2次元の膜厚分布を求めることができる。上記検出器を複数用い並列に設置し同時に計測することにより高速に膜厚分布を求めることができる。多層構造の計測対象膜を計測する際、下層からの反射光が誤差の原因となる。そこで膜による吸収の大きい波長帯域の光を用いることにより下層からの反射光の影響を小さくでき、高精度の計測が可能となる。計測対象構造が多層である場合、加工の前後で膜厚を計測する等によりその任意の層の厚さを計測することができる。例えば、表面の膜厚だけでなく、パターンの厚さや下層の層間膜厚を求めることができる(図24)。膜厚計測用のパターンを形成する必要が無いため有効面積の大きなデバイスが作れる。層間膜厚を計測することにより、配線間の電気的な容量等を評価することができ、デバイスの性能を予測することができる。任意の層の膜厚を計測して高精度に膜厚を管理・制御することにより、高精度にデバイスの性能をコントロールすることができる。反射光の分光分布を解析処理する、または別に表面の凹凸計測手段をそなえ、膜厚と凹凸とを同時に計測することができる(図11)。凹凸計測手段として例えば、特開平7-74088号公報記載の表面凹凸計測手段を用いても実現できる。計測視野をパターン幅以下にすれば、膜厚を計測することによってパターン形状の確認ができる。得られた計測結果と、予め取り込んでおいたパターン情報とを比較することによりデバイスパターンの形状不良や異物を検出することができる(図16(c))。このときその異物や形状等の不良の表面からの深さがわかるので、それらがどの工程で発生したかを特定することができる。計測した膜厚あるいは分布データを歩留りあるいは品質管理システム等へ供給し不良解析に使用することもできる。異物検査装置や外見検査装置は層間絶縁膜工程ではその膜厚によって感度に変化する。そのためこれら検査装置に膜厚計測装置を取り付けることにより計測感度の自動条件出しや感度補正を行うことができ高精度な検査が可能となる。例えば計測した膜厚によって検出器の位置を変化させる等により感度の低下を小さくすることができる。加工の前後で計測を行う等のことにより、加工による被加工物質の材質例えば屈折率等の変化を検出することができる。またこの変化より、材料内部の転移密

度等の変化を予測することができる。検出器で検出した反射光の強度から、計測対象の局所的なパターン面積率や表面の面荒れの状態を求めることができる。以上に説明したように、シリコンウェハ上に半導体デバイスを製造する方法および製造ラインにおける成膜後の表面の平坦化処理装置に本発明による膜厚計測ユニット組み込むことにより、平坦化処理を行ったウェハに対して最表面膜厚を高精度に計測することが可能となるので、高精度な膜厚管理が可能となり、膜厚管理のために平坦化処理装置を調整する時間を削減することが可能になり、工程のスループットの向上がはかれる。上記実施例はCMP加工後のパターンの形成されたウェハ表面の膜厚について述べているが、対象が同様の構造の他の工程又は半導体デバイス以外の他の膜、または光学的に透明な多層構造の膜に対しても同様の膜厚計測が可能である。

【発明の効果】本発明のよれば透明膜を高精度に膜厚計測することが可能となり、計測した膜厚データを基に高精度の膜厚管理が可能となる。また、本発明によれば、下地パターンの影響を受けることなく表面の透明な膜の膜厚及びその分布を、 $\pm 20 \text{ nm}$ 以下の高い精度で計測できるので、高精度な膜厚の管理を行うことができる。また、本発明によれば、下地パターンの影響を受けることなく表面の透明な膜の膜厚及びその分布を計測できるので、試料上の任意の点に膜厚を高精度に測定することができる。さらに、本発明を、半導体デバイスの製造工程に適用した場合、下地パターンの影響を受けることなく表面に形成された透明な膜の厚さ計測できるので、ウェハ全面での膜厚の分布とともに、ウェハ上に形成された各チップ内の膜厚の分布も計測できるので、この計測した結果を製造工程にフィードバックすることにより、高精度な膜厚の管理が可能になり、高品質な半導体デバイスを、安定して生産できるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、本発明をCMP加工装置に適用した例を示す概略構成図である。

【図2】図2は、本発明による検出光学系の正面の略断面図である。

【図3】図3は、本発明によるデータの取り込みから膜厚を算出するまでの処理の流れの概略図である。

【図4】図4は、本発明の検出対象の膜で、一層のパターンが存在する場合の断面図である。

【図5】図5は、(a)理論分光反射率分布の一例、(b)検出波長範囲に制限がある場合の理論分光反射率分布の一例である。

【図6】図6は、膜厚算出に周波数と位相とを用いた場合の算出結果例を示すグラフである。

【図7】図7は、補正曲線の一例である。

【図8】図8は、CMP加工装置と本発明による膜厚計測装置との概略構成を説明する正面図で、(a)は洗浄、乾燥工程後、(b)は研磨加工終了後で洗浄・乾

燥を行う前、(c)は研磨加工中、(d)は研磨加工を中断して、それぞれ計測を行う場合を示す。

【図9】図9は、本発明による装置構成の一例を示す正面図である。

【図10】図10は、本発明による光学系の一例を示す正面図である。

【図11】図11は、アライメント方法の一例を示す平面図である。

【図12】図12は、設計情報を用いた場合の計測位置決め方法を示すパターンの平面図である。

【図13】図13は、1チップの計測で設定した格子の格子点を計測する場合の計測点の一例を示す平面図である。

【図14】図14は、計測が可能な場合と困難な場合の計測視野位置の一例を示すパターンの平面図である。

【図15】図15は、計測視野の大きさの切り替え手段を備えた光学系の正面図である。

【図16】図16は、計測視野の違いによる計測結果の違いの一例を示す図である。

【図17】図17は、膜の平面構造の設定方法の一例を示すディスプレイ画面の正面図である。

【図18】図18は、格子点計測する際の格子の設定方法の一例を示すディスプレイ画面の正面図である。

【図19】図19は、本発明の実施例の装置の計測シーケンスの一例を示すフロー図である。

【図20】図20は、ウェハ表面の膜厚分布と表面凹凸とを同時に計測する場合の概略構成及び結果表示の一例を示すディスプレイ画面の正面図である。

【図21】図21は、膜厚計測結果をプロセス条件にフィードバックするシステムの一例を示す概略構成図である。

【図22】図22は、研磨加工終了後で洗浄・乾燥を行う前に水中に有るウェハの膜厚を計測する場合の構成を示す正面の略断面図であり、(a)は光学検出系の一部を水中に挿入して計測をする場合、(b)は光学窓を介して計測をする場合である。

【図23】図23は、水中で膜厚を計測を行う際の影響及び補正方法の一例を示す図である。

【図24】図24は、多層構造の各厚さを計測する場合の概略構成及び結果表示の一例を示すディスプレイ画面の正面図である。

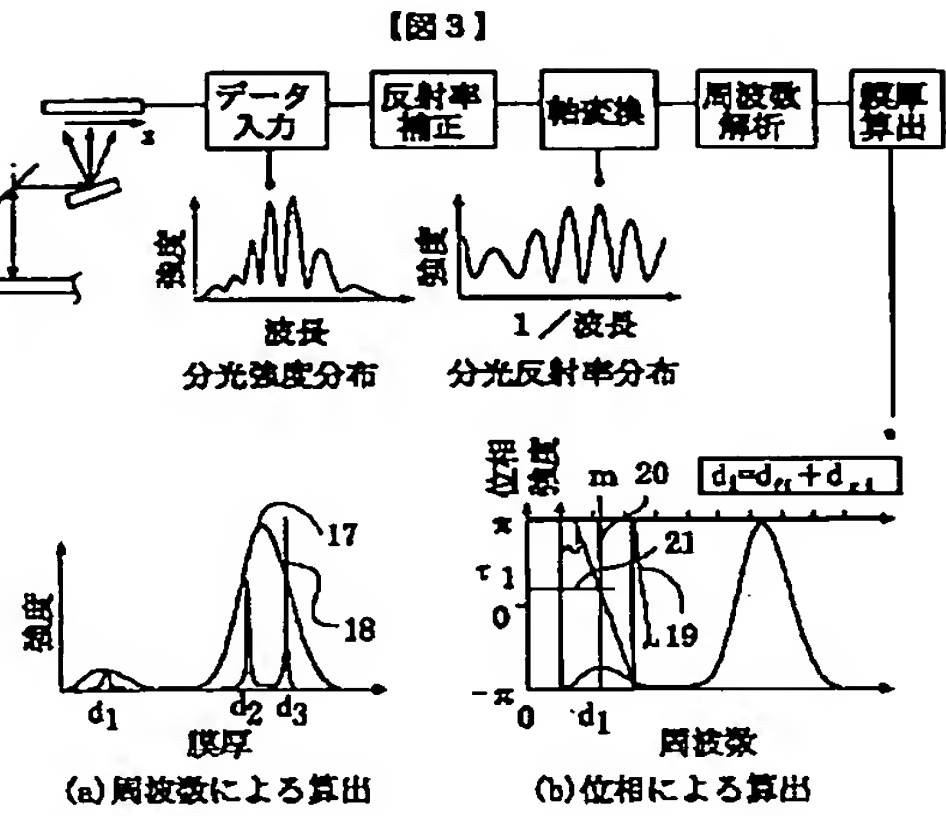
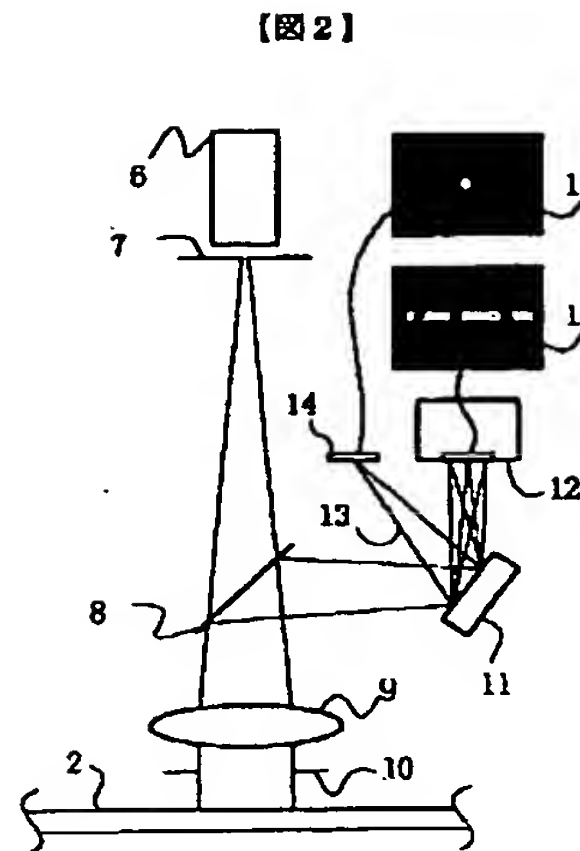
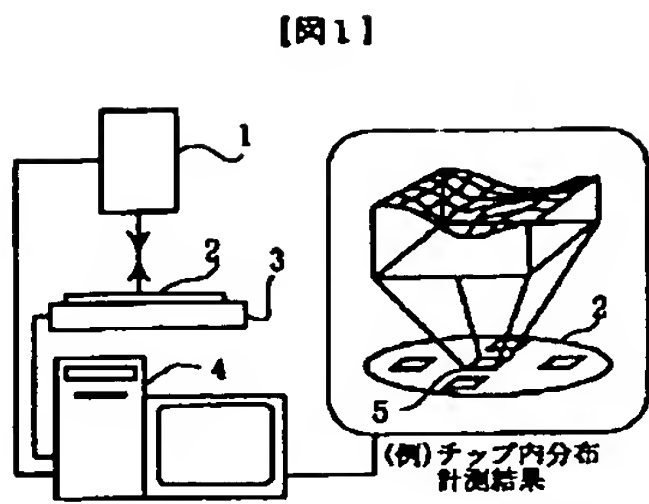
【符号の説明】

- 1……検出光学系 2……ウェハ 3……ステージ
- 4……パーソナルコンピュータ 5……計測チップ
- 6……光源
- 7……ピンホール 8……ビームスプリッタ 9……
- レンズ
- 10……虹彩しぼり 11……回折格子 12……CCD
- カメラ 13……0次光
- 14……0次光位置検出センサ 15……分光強度分布画像
- 16……0次光強度分布画像 17……FFT周波数スペクトル
- 18……MEM周波数スペクトル 19……位相スペクトル
- 20……ピーク周波数 21……ピーク周波数の位相
- 22……パターン（配線）
- 23……膜下地 24……膜 25……分光波形
- 26……検出帯域が限られる場合の分光波形 27……補正曲線
- 28……ウェハ支持具 29……研磨盤 30……ウェハ
- 搬送路（水中）
- 31……ステージ制御部 32……信号処理部 33……
- インターフェース
- 34……白色光源 35……ビームスプリッタ 36……
- レンズ（1）
- 37……レンズ（2） 38……空間フィルタ 39……
- ピンホール
- 40……分光器 41……CCDカメラ 42……アライ
- メントパターン
- 43……計測点 44……計測視野 45……配線パター
- ン 46……対物レンズ
- 47……パターン 48……膜 49……異物 51……
- パターン設定画面
- 52……パターン配置図 53……格子設定画面 54……
- 設計情報
- 55……膜厚分布 56……表面凹凸分布 57……デバ
- イスパターン
- 59……研磨パッド 60……スラリー 61……検出窓
- 62……大気中計測時の分光波形 63……水中計測時の
- 分光波形
- 64……トレンド成分。

【図1】

【図2】

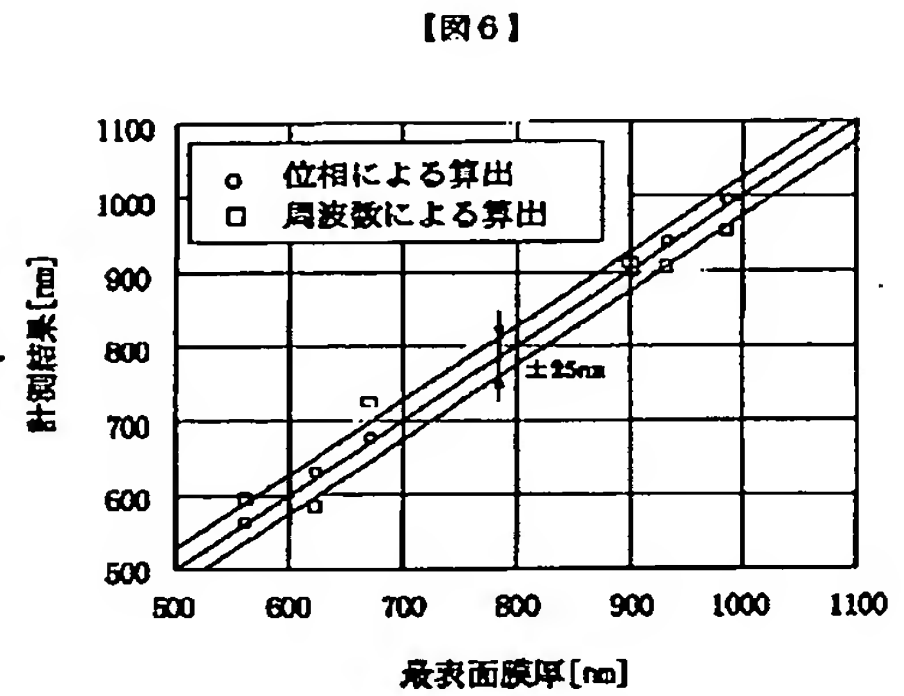
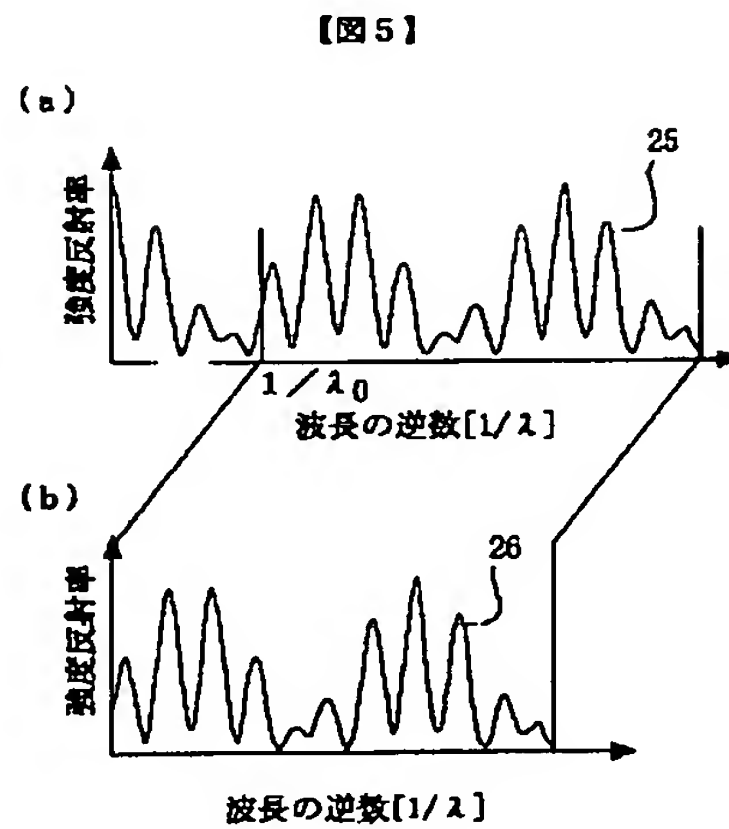
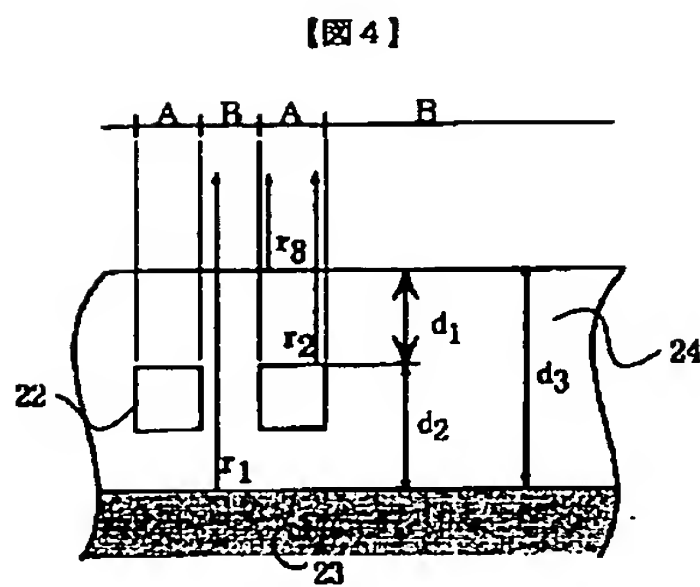
【図3】



【図4】

【図5】

【図6】

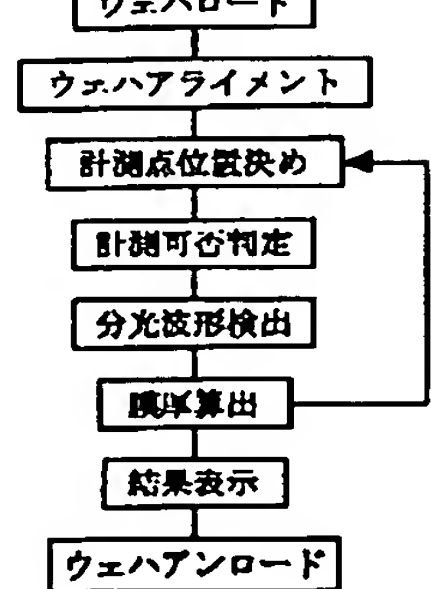
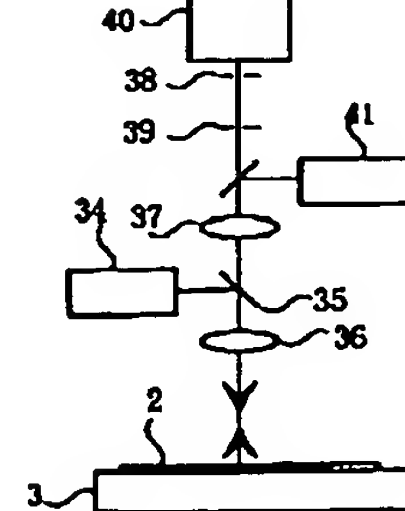
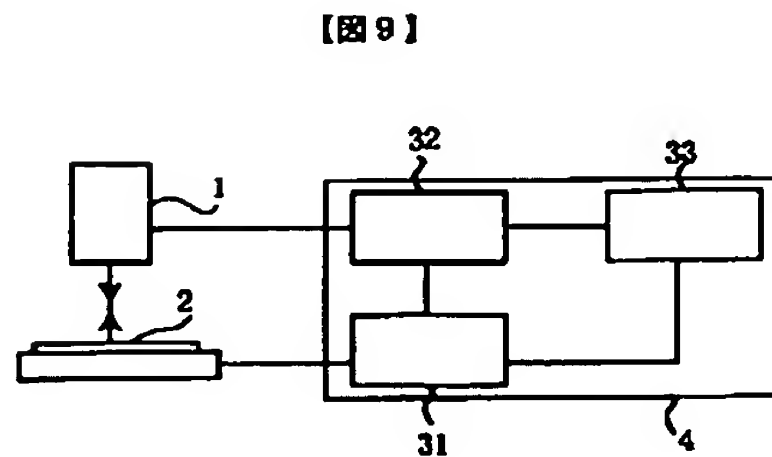
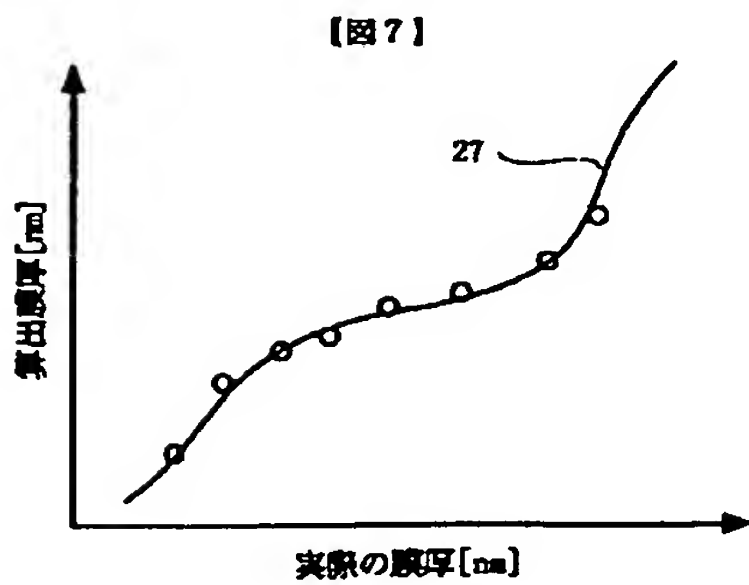


【図7】

【図9】

【図10】

【図19】

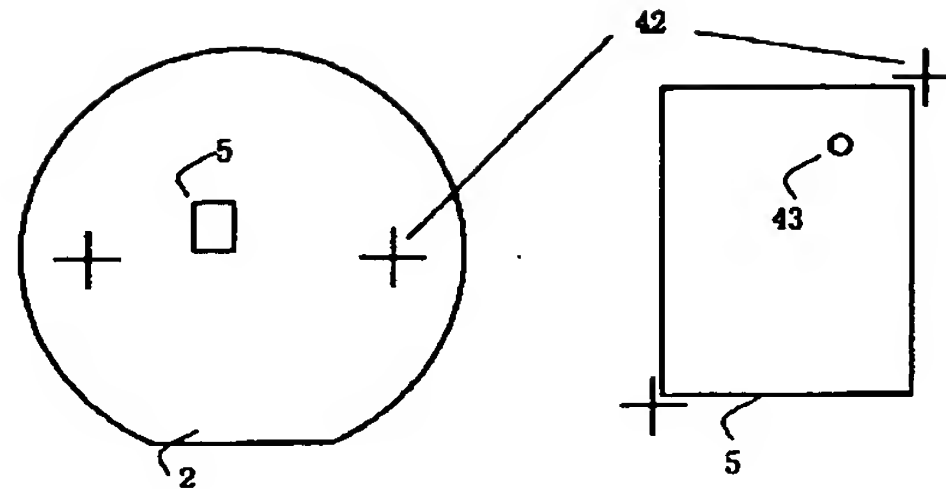
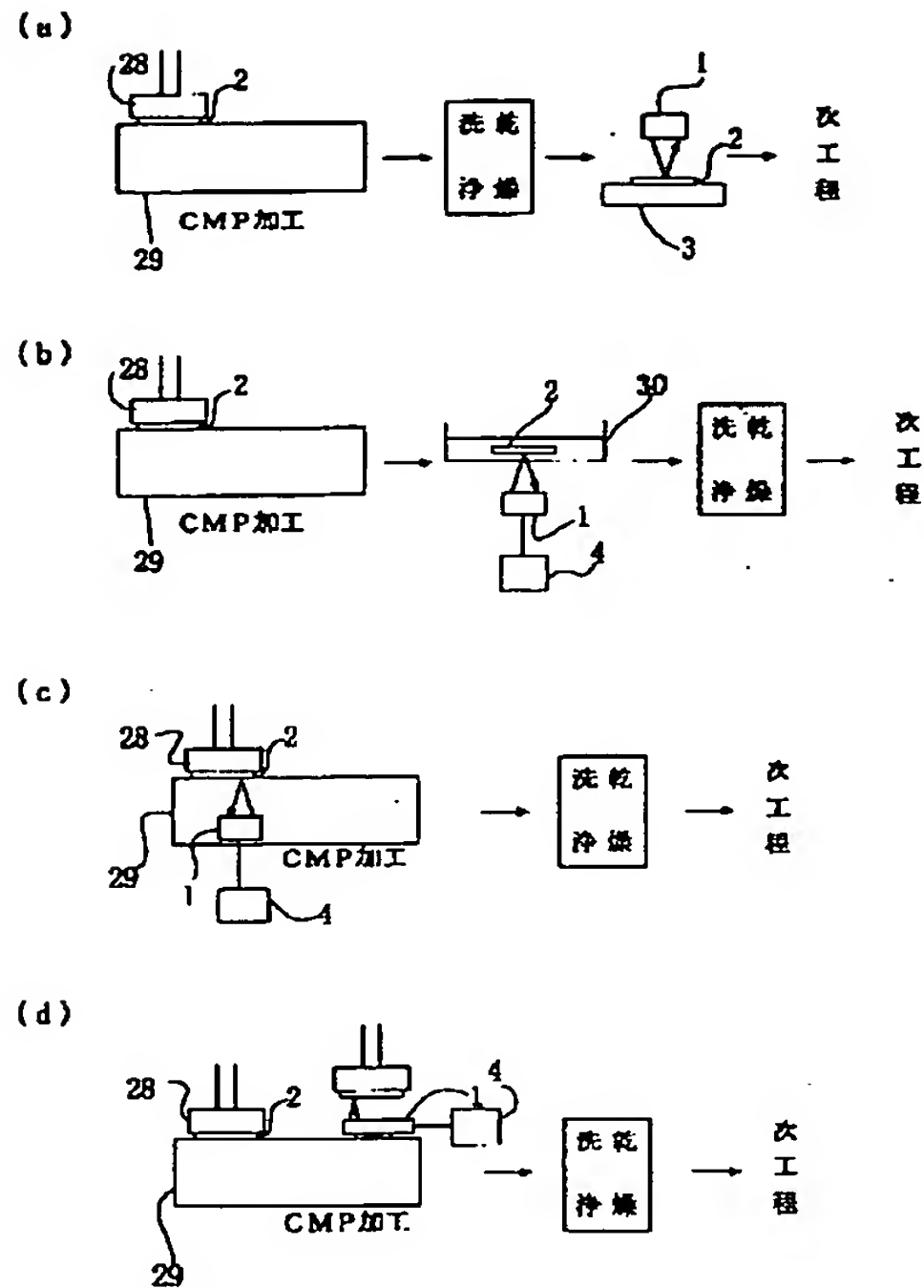


【図8】

【図11】

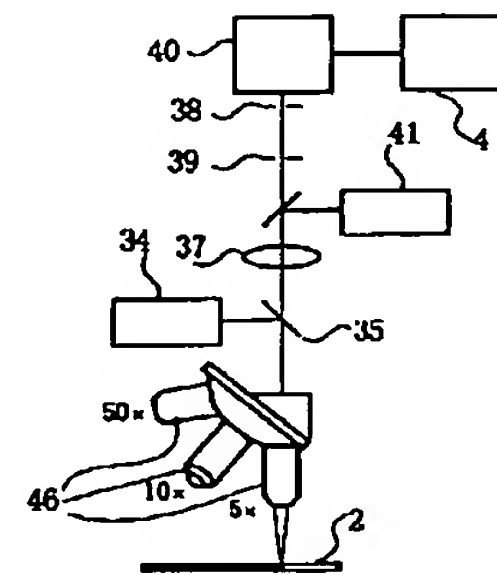
【図8】

【図11】



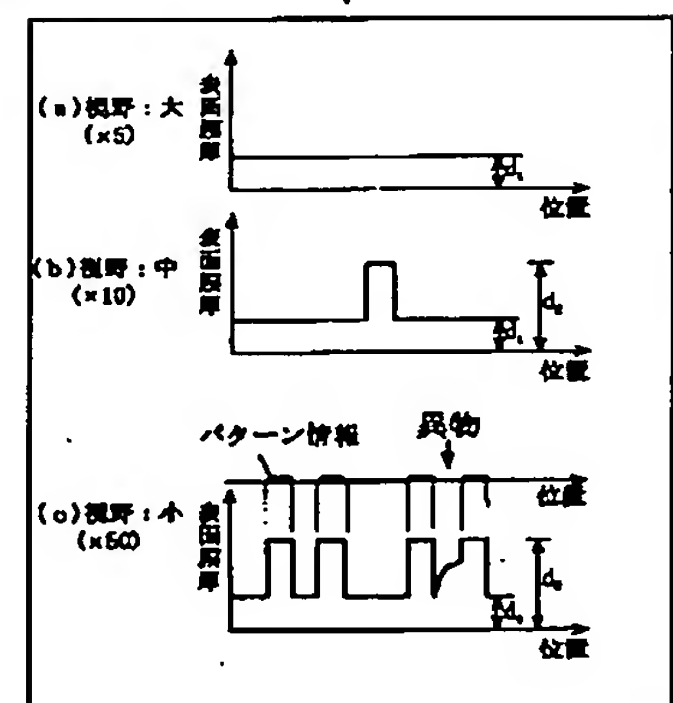
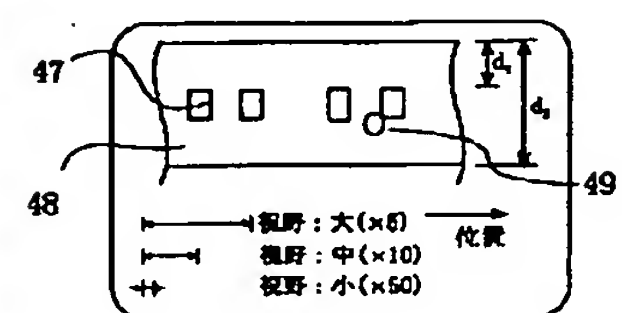
【図15】

【図15】



【図16】

【図16】

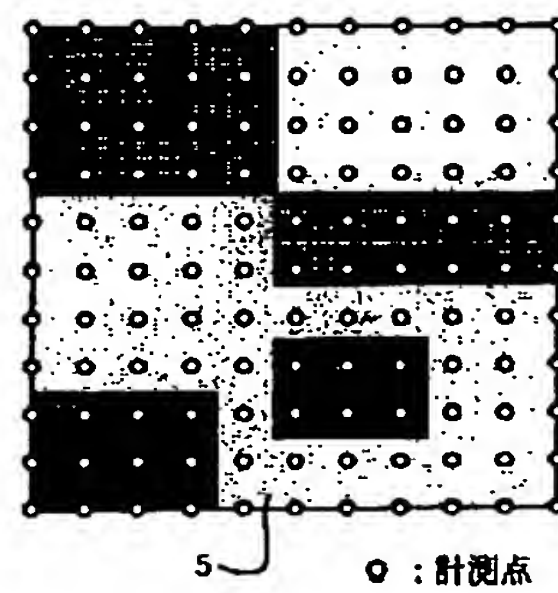
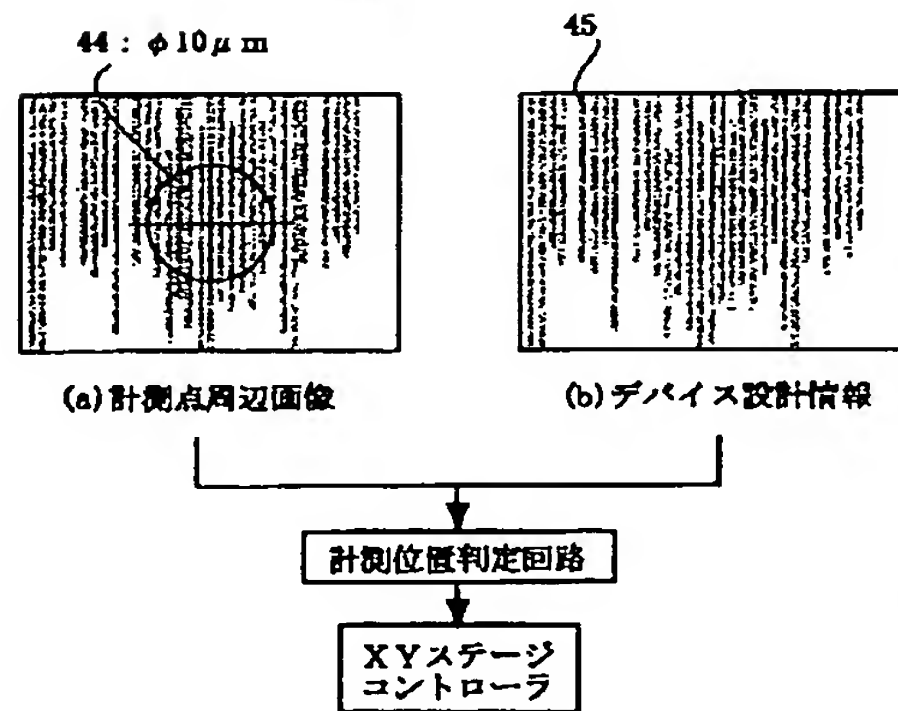


【図12】

【図13】

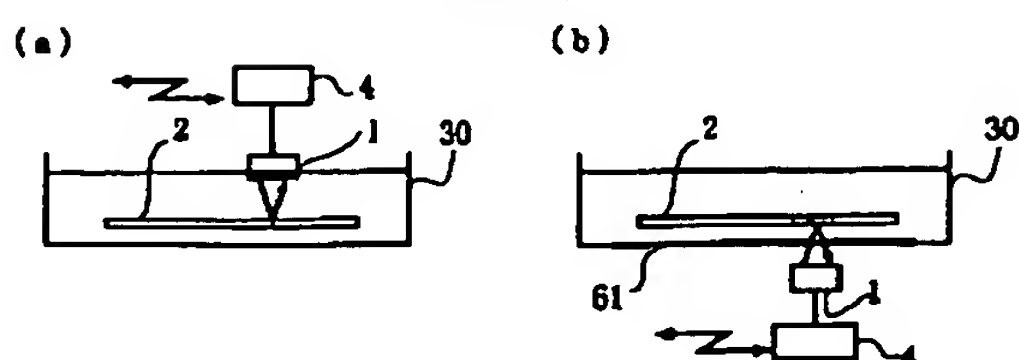
【図12】

【図13】



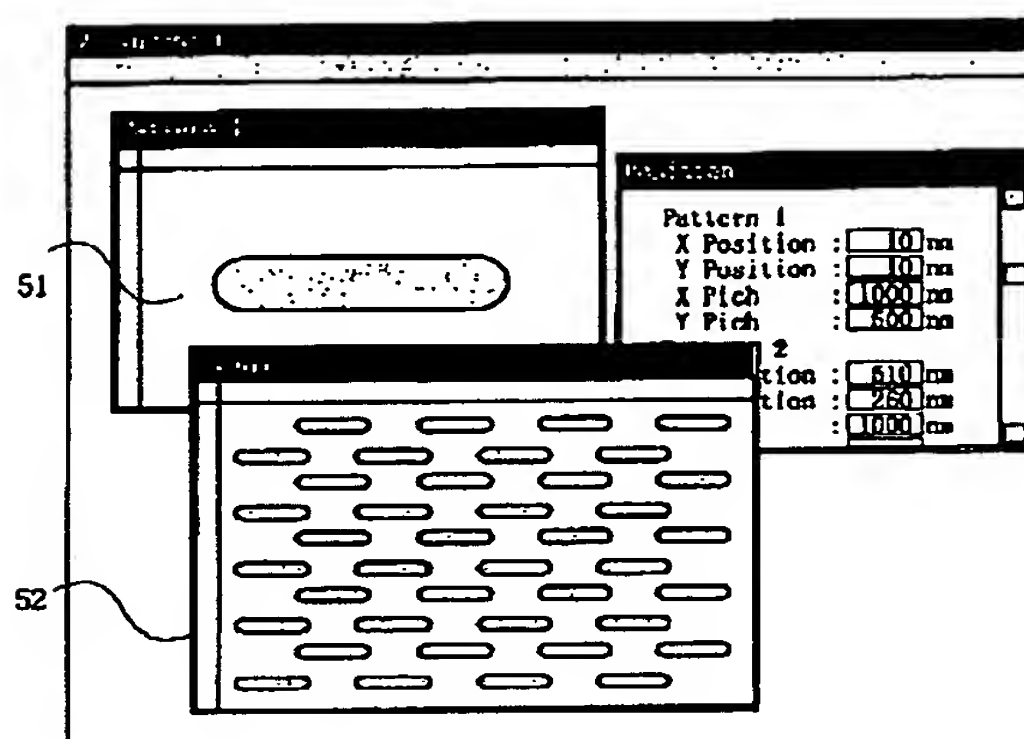
【図22】

【図22】



【图 17】

【 1 7 】

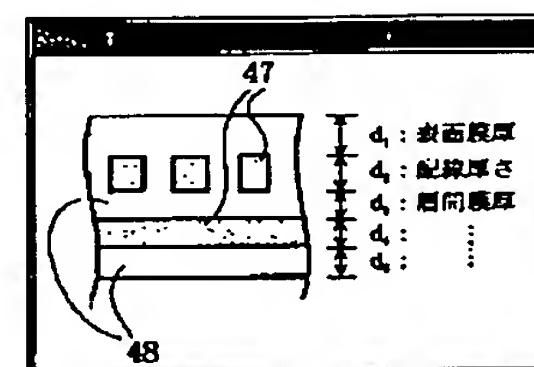
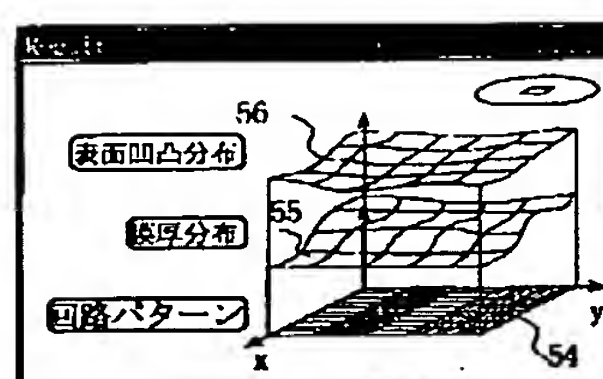


【図 20】


【図 24】

【例 20】

【圖 24】



小視野による局所プロファイル



表面凹凸

回路膜厚

回路パターン

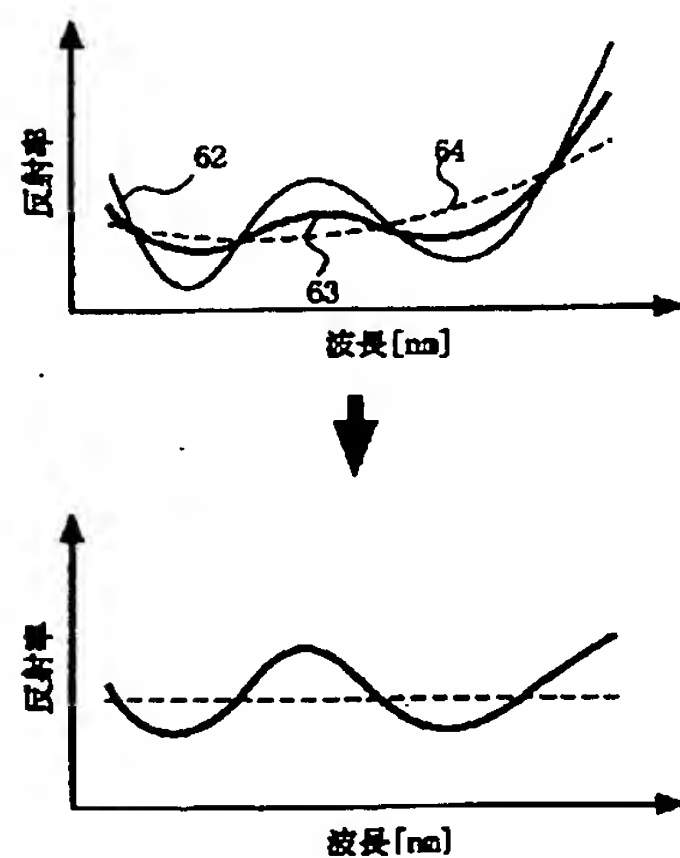
大視野によるプロファイル

表面凹凸

回路膜厚

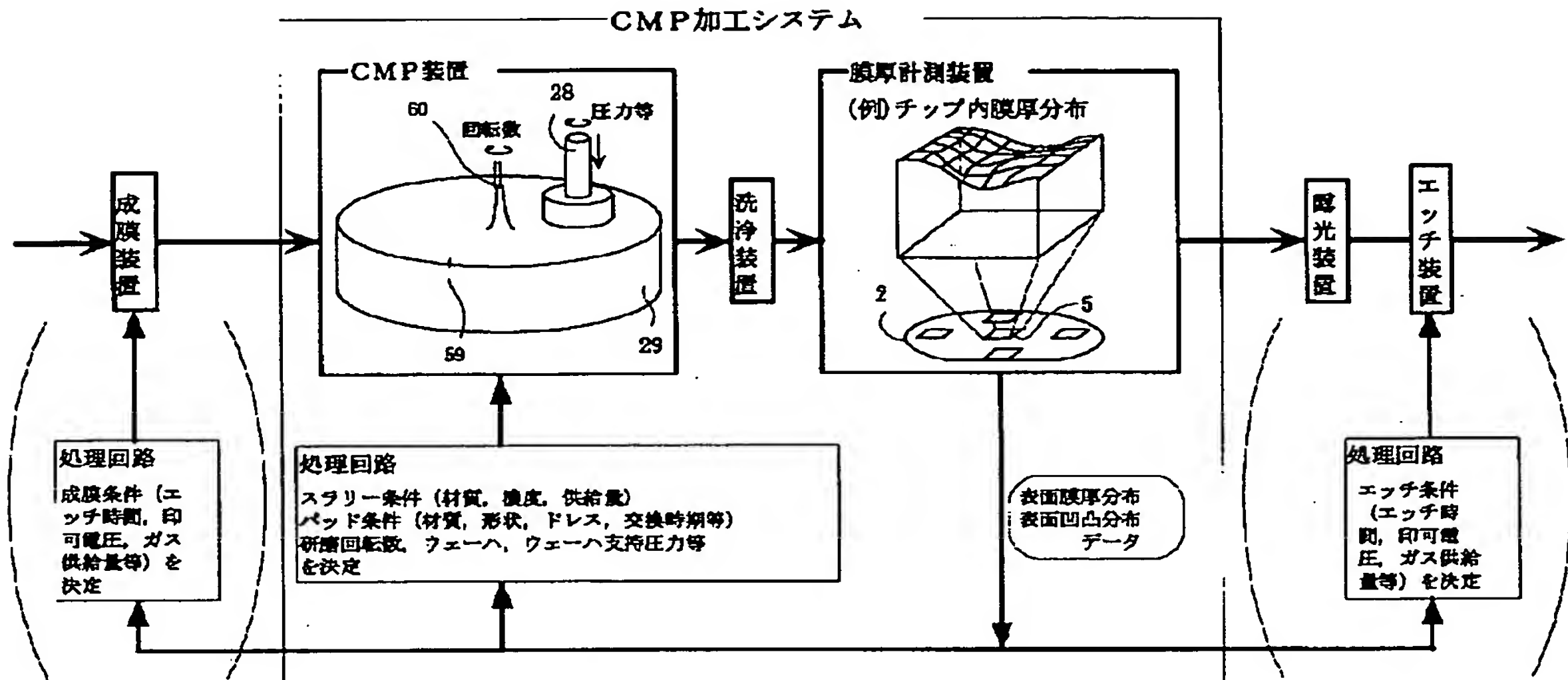
回路パターン

x



【図21】

【図21】



フロントページの続き

- (72)発明者 二宮 隆典
茨城県ひたちなか市市毛882番地株式会社
日立製作所計測器事業部内
- (72)発明者 土山 洋史
東京都小平市上水本町五丁目20番1号株式
会社日立製作所半導体事業部内
- (72)発明者 野口 稔
神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式
会社日立製作所生産技術研究所内
- (72)発明者 金井 史幸
東京都小平市上水本町五丁目20番1号株式
会社日立製作所半導体事業部内
- (72)発明者 野本 峰生
神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地株式
会社日立製作所生産技術研究所内

Fターム(参考) 2F065 AA30 BB22 CC18 CC19 CC31
DD00 FF04 FF27 FF56 GG02
GG03 GG04 GG22 GG23 GG24
JJ02 JJ03 JJ25 JJ26 LL22
LL30 LL42 LL46 LL67 PP22
PP24 QQ16 QQ24 QQ25 QQ29
QQ39 QQ44 SS03 SS13 UU05
UU07
3C034 AA13 AA17 BB93 CA03 CA22
CA30 CB13 DD20
3C058 AA07 AC02 BA07 BA09 CB01
CB03 CB10 DA12 DA17
4M106 AA01 AA20 BA04 BA05 CA48
DH03 DH12 DH31 DH32 DH37
DH57 DJ18